

La présente invention concerne un procédé d'estimation du nombre de crayon(s) non-étanche(s) dans des assemblages de combustible nucléaire chargés dans un réacteur.

L'invention s'applique en particulier aux réacteurs nucléaires à eau
5 pressurisée.

Depuis de nombreuses années, des mesures ont été adoptées pour améliorer les performances des réacteurs nucléaires et pour réduire les coûts.

Ces mesures comprennent notamment l'augmentation du taux de combustion des combustibles et l'augmentation de la durée des cycles qui leur
10 sont imposés en réacteur.

Il en résulte des contraintes plus importantes sur les assemblages et notamment sur les gaines des crayons qui renferment le combustible nucléaire, généralement sous forme de pastilles empilées.

Ces contraintes plus importantes peuvent conduire à l'apparition de défauts dans les gaines par lesquels les produits de fission sont susceptibles
15 d'être relâchés dans le circuit primaire du réacteur nucléaire.

Il est souhaitable de diagnostiquer le nombre de ces défauts d'étanchéité, leur gravité et si possible leur localisation afin de pouvoir en tenir compte lors du pilotage du fonctionnement du réacteur et/ou anticiper sur les
20 mesures à prendre à la fin du cycle en cours pour remplacer, si nécessaire, le ou les assemblages endommagés(s).

Le document EP-1 031 159 a exposé plus en détail les mécanismes d'apparition de ces défauts dans les gaines des crayons et l'intérêt de diagnostiquer leur présence. Toutefois, ce document ne décrit pas de procédé
25 précis permettant d'estimer le nombre de crayon(s) non-étanche(s).

L'exposé de MM. PARRAT, GENIN, MUSANTE, PETIT et HARRER intitulé « Failed rod diagnosis and primary circuit contamination level determination thanks to the DIADEME code » et présenté lors du congrès de l'IAEA du 17 au 21 juin 2002 à Bratislava (IAEA Technical Meeting on Fuel
30 Failure in Water Reactors : Causes and Mitigation) décrit en revanche un tel procédé.

Dans ce procédé, on calcule la fraction relâchée globale de ^{133}Xe , c'est-à-dire la fraction relâchée par l'ensemble des crayons non-étanches. On calcule la pente des gaz de fission, c'est à dire la pente de la droite de corrélation
35 des points correspondant aux gaz de fission dans un diagramme logarithmique ayant la constante radioactive de désintégration du produit de fission considéré en abscisse et la fraction relâchée du produit de fission considéré en ordonnée.

Ce paramètre, représentatif de la puissance linéique moyenne d'un crayon non-étanche, est utilisé pour déterminer la fraction relâchée unitaire de ^{133}Xe , c'est à dire la fraction relâchée par un seul crayon non-étanche.

Enfin, en divisant la fraction relâchée globale par la fraction relâchée unitaire de ^{133}Xe , on peut estimer le nombre de crayons non-étanches présents dans le cœur du réacteur nucléaire.

Toutefois, et comme reconnu dans la partie 3.2 de cet exposé, le nombre de crayons non-étanches ainsi estimé est nettement plus faible que celui réellement constaté, notamment pour les assemblages de combustible nucléaire à fort taux de combustion (« burn-up » en anglais).

Pour pallier cet inconvénient, ce document a proposé en outre de comparer la fraction relâchée de ^{131}I dans l'eau du circuit primaire pendant un transitoire de fonctionnement, par rapport à cette même fraction lorsque le réacteur fonctionne à sa puissance nominale.

Ce procédé amélioré présente notamment l'inconvénient d'être contraignant, puisqu'il faut attendre l'apparition d'un transitoire ou le provoquer afin de pouvoir obtenir une estimation plus satisfaisante. En outre, ce procédé amélioré ne semble pas fiable dans la mesure où la quantité de ^{131}I relâchée dépend de l'historique de puissance du ou des crayon(s) non-étanche(s) et notamment des transitoires précédents.

Un but de l'invention est de résoudre ce problème en fournissant un procédé d'estimation du nombre de crayon(s) non-étanche(s) qui soit moins contraignant et plus fiable.

A cet effet, l'invention a pour objet un procédé d'estimation du nombre (N) de crayon(s) non-étanche(s) dans des assemblages de combustible nucléaire chargés dans un réacteur (1), le procédé comprenant les étapes consistant à :

a) calculer la fraction relâchée globale ($\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe}) \text{ CNE}$) d'au moins un produit de fission (^{133}Xe) au travers du ou des crayon(s) non-étanche(s) à partir de mesures effectuées sur le réacteur nucléaire,

b) fournir une valeur d'un premier paramètre (\underline{n}) représentatif de la puissance linéique du ou des crayon(s) (24) non-étanche(s),

c) fournir une valeur au moins d'un deuxième paramètre représentatif du jeu entre la gaine (33) du ou des crayon(s) (24) non-étanche(s) et le combustible (36) qui y est contenu,

d) estimer à partir des valeurs des premier et deuxième paramètres la fraction relâchée unitaire du produit de fission pour un crayon non-étanche ($\frac{R}{B}$ (^{133}Xe) unitaire), et

5 e) déduire, de la fraction relâchée globale et de la fraction relâchée unitaire, le nombre (N) de crayon(s) non-étanche(s).

Selon des modes particuliers de réalisation, le procédé peut comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles :

10 - l'étape d) est assurée grâce à un système d'inférences flou,
- le système d'inférences flou met en œuvre des règles de calcul déterminées par apprentissage à partir d'une base de données regroupant des jeux de valeurs du premier et deuxième paramètres et de la fraction relâchée unitaire pour des cas réels,

15 - le procédé comprend en outre des étapes consistant à :
f) mettre à jour la base de données d'apprentissage à partir de valeurs correspondant à au moins un nouveau cas réel,

g) effectuer un réapprentissage du système d'inférences flou,
- le système d'inférences flou comprend deux fonctions d'appartenance par paramètre,

20 - le premier paramètre est la pente d'une droite de corrélation de points correspondants à des gaz de fission dans un diagramme logarithmique constante radioactive de désintégration/fraction relâchée, et
- le deuxième paramètre est le taux de combustion.

25 L'invention a également pour objet un dispositif d'estimation du nombre de crayon(s) non-étanche(s) dans des assemblages de combustible nucléaire chargés dans un réacteur, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de mise en œuvre des étapes d'un procédé tel que défini ci-dessus.

30 Selon une variante, le dispositif comprend au moins un ordinateur et des moyens de stockage dans lesquels sont stockés au moins un programme pour l'exécution des étapes du procédé d'estimation.

L'invention a également pour objet un support utilisable dans un ordinateur sur lequel est enregistré un programme tel que défini ci-dessus.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et faite en se référant aux dessins annexés, sur lesquels :

- 5 - la figure 1 est une vue schématique illustrant un réacteur nucléaire à eau pressurisée équipé d'un dispositif d'estimation selon l'invention,
- la figure 2 est une vue schématique en coupe longitudinale d'un crayon d'un assemblage de combustible nucléaire chargé dans le réacteur de la figure 1,
- 10 - la figure 3 est un organigramme illustrant des étapes successives du procédé mis en œuvre par le dispositif d'estimation de la figure 1,
- la figure 4 est un diagramme logarithmique illustrant la corrélation entre la constante radioactive de désintégration et la fraction relâchée des gaz de fission,
- les figures 5A et 5B sont des graphiques illustrant les fonctions d'appartenance du système d'inférences flou utilisé dans le procédé mis en œuvre par le dispositif d'estimation de la figure 1, avant apprentissage, et
- 15 - les figures 6A et 6B sont des graphiques analogues aux figures 5A et 5B, après apprentissage.

La figure 1 illustre schématiquement un réacteur nucléaire 1 à eau pressurisée qui comprend classiquement :

- 20 - un cœur 2 contenu dans une cuve 18,
- un générateur de vapeur 3,
- une turbine 4 couplée à un générateur 5 d'énergie électrique, et
- un condenseur 6.

25 Le réacteur 1 comprend un circuit primaire 8 équipé d'une pompe 9 et dans lequel circule de l'eau sous pression, selon le trajet matérialisé par les flèches sur la figure 1. Cette eau remonte notamment au travers du cœur 2 pour y être réchauffée en assurant la réfrigération du cœur 2.

30 Le circuit primaire 8 comprend en outre un pressuriseur 10 permettant de mettre sous pression l'eau circulant dans le circuit primaire 8.

Un circuit 11 de contrôle volumétrique et chimique, dénommé généralement circuit RCV, est raccordé au circuit primaire 8, notamment pour assurer la filtration et la purification de l'eau circulant dans le circuit primaire 8.

L'eau du circuit primaire 8 alimente le générateur de vapeur 3 où elle est refroidie en assurant la vaporisation d'eau circulant dans un circuit secondaire 12.

La vapeur produite par le générateur 3 est canalisée par le circuit secondaire 12 vers la turbine 4 puis vers le condenseur 6 où cette vapeur est condensée par échange de chaleur indirect avec de l'eau de refroidissement circulant dans le condenseur 6.

Le circuit secondaire 12 comprend en aval du condenseur 6 une pompe 13 et un réchauffeur 14.

De manière classique également, le cœur 2 comprend des assemblages combustibles 16 qui sont chargés dans une cuve 18. Un seul assemblage 16 est représenté sur la figure 1, mais le cœur 2 comprend par exemple 157 assemblages 16.

Le réacteur 2 comprend des grappes de contrôle 20 qui sont disposées dans la cuve 18 au-dessus de certains assemblages 16. Une seule grappe 20 est représentée sur la figure 1, mais le cœur 2 peut comprendre par exemple environ 70 grappes 20.

Les grappes 20 peuvent être déplacées par des mécanismes 22 pour venir s'insérer dans les assemblages combustibles 16 qu'elles surplombent.

Classiquement, chaque grappe de contrôle 20 comprend des crayons de contrôle en un matériau absorbant les neutrons.

Ainsi, le déplacement vertical de chaque grappe 20 permet de régler la réactivité du réacteur 1, en fonction de l'enfoncement des grappes 20 dans les assemblages combustibles 16.

Chaque assemblage combustible 16 comprend de manière classique un réseau de crayons combustibles 24 et un squelette de support des crayons combustibles 24, le squelette comprenant notamment des grilles.

Comme illustré par la figure 2, chaque crayon combustible 24 comprend de manière classique, une gaine 33 sous forme d'un tube fermé à son extrémité inférieure par un bouchon inférieur 34 et à son extrémité supérieure par un bouchon supérieur 35. Le crayon 24 comprend une série de pastilles 36 de combustible nucléaire. Les pastilles 36 sont empilées dans la gaine 33 et

prennent appui contre le bouchon inférieur 34. Un ressort de maintien 40 est disposé dans le tronçon supérieur de la gaine 33 pour prendre appui sur le bouchon supérieur 35 et sur la pastille 36 supérieure.

Classiquement, les pastilles 36 sont en oxyde d'uranium et la gaine 33
5 en alliage de zirconium.

Sur la figure 2, qui correspond à un crayon combustible 24 issu de fabrication et avant d'irradiation, il existe un jeu radial J entre les pastilles 36 et la gaine 33. Cela est illustré plus particulièrement par la partie cerclée agrandie de la figure 2.

10 Lors du fonctionnement du réacteur 1, le combustible nucléaire des pastilles 36 peut être, selon le terme employé dans la technique, conditionné.

Le conditionnement se caractérise essentiellement par la fermeture du jeu J entre les pastilles 36 et la gaine 33, due au fluage de la gaine 33 et au gonflement des pastilles 36.

15 La gaine 33 constitue une barrière empêchant normalement les produits de la fission du combustible nucléaire de contaminer l'eau du circuit primaire 8. Toutefois, des défauts peuvent apparaître dans la gaine 33 en cours de fonctionnement, de sorte que celle-ci n'est plus étanche.

Il existe plusieurs raisons à l'origine de tels défauts d'étanchéité, par
20 exemple la présence de corps migrants dans l'eau du circuit primaire 8 qui viennent se coincer entre plusieurs crayons 24, un problème apparu lors de la fabrication d'un crayon 24, la présence de composés hydrogénés entraînant une hydruration intérieure de la gaine 33, la vibration latérale des crayons 24 entraînant leur frottement sur des ressorts de grilles...

25 Pour pouvoir estimer le nombre N de crayons non-étanches dans les assemblages 16 du cœur 2 du réacteur 1, celui-ci comprend un dispositif informatique 40 visible sur la figure 1.

Ce dispositif informatique 40 comprend par exemple un ordinateur ou
30 unité de traitement d'informations 42 comprenant un ou plusieurs processeur(s), des moyens 44 de stockage de données, des moyens 46 de saisie de données tels qu'un clavier, éventuellement des moyens 48 d'affichage, et une interface 49 d'entrée/sortie.

Le dispositif informatique 40 est relié par l'interface 49 à des capteurs
35 50, 52 et 54 d'acquisition de paramètres relatifs au fonctionnement du réacteur 1. Ces capteurs 50, 52 et 54 peuvent transmettre des informations au dispositif 40

soit par l'intermédiaire d'un réseau local soit par l'intermédiaire d'un réseau tel que le réseau Internet également connu sous le nom de réseau WEB (World Wide Web).

Le capteur 50 est un capteur mesurant par exemple le débit D d'eau
5 circulant dans le circuit 11.

Le capteur 52 est par exemple un spectromètre gamma mesurant les activités des produits de fission présents dans l'eau du circuit primaire 8. Pour faciliter la représentation, le capteur 52 a été schématisé comme assurant une mesure in-situ de ces activités. Toutefois, ces mesures sont en pratique plutôt
10 effectuées sur des échantillons d'eau prélevés dans le circuit primaire 8.

Le capteur 54 est un capteur mesurant par exemple la puissance moyenne P du cœur 2. D'autres capteurs 54 non-représentés peuvent fournir d'autres données relatives au fonctionnement du réacteur 1.

Des instructions exécutables par l'ordinateur 42 sont stockées sous la
15 forme d'un ou plusieurs programmes dans les moyens 44 de stockage. Ces différentes instructions, lorsqu'elles sont exécutées par l'ordinateur 42, permettent la mise en oeuvre du procédé illustré par l'organigramme de la figure 3.

Dans une première étape illustrée par le bloc 60 sur la figure 3,
20 l'ordinateur 42 va utiliser les données fournies par les capteurs 50, 52 à 54.

Plus précisément, les données utilisées dans ces étapes comprennent par exemple le débit D, la puissance moyenne du cœur P et des caractéristiques C relatives au réacteur 1 et qui ont été préalablement stockées dans les moyens 44 de stockage, par exemple le volume d'eau contenu dans la cuve 18.

Les informations fournies par le capteur 52 et utilisées dans l'étape 60
25 comprennent par exemple les activités :

- des gaz de fission ^{133}Xe , $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{135}Xe , ^{138}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr et ^{88}Kr , et
- des produits de fission ^{131}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , et éventuellement ^{134}Cs et ^{137}Cs .

Dans une première sous-étape facultative, l'ordinateur 42 peut calculer
30 le rapport d'activités $\frac{^{133}\text{Xe}}{^{135}\text{Xe}}$ pour déterminer si un crayon non-étanche est présent dans les assemblages 16 du cœur 2.

On peut considérer qu'un crayon non-étanche est présent à partir du moment où ce rapport est supérieur à 1. Bien entendu, le seuil de détection peut
35 être inférieur à 1, par exemple de 0,9 ou d'autres paramètres peuvent être utilisés

pour déterminer si un ou plusieurs crayons non-étanches sont présents, par exemple, l'activité du ^{133}Xe .

Sachant qu'au moins un crayon non-étanche est présent, l'ordinateur 42 va, dans une deuxième sous-étape, déterminer la fraction relâchée globale $\frac{R}{B}$ de ^{133}Xe liée à la présence des crayons non-étanches, notée $\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe}) \text{ CNE}$.

Dans ce rapport, B correspond au nombre d'atomes créés par seconde dans le combustible. R est le nombre d'atomes du produit de fission relâchés par seconde dans l'eau du circuit primaire 8.

$\frac{R}{B}$ est calculé par l'ordinateur 42 à partir d'un programme 62, par exemple du type de celui mentionné dans l'exposé de 2002 précité, et notamment de l'activité du produit de fission considéré dans le circuit primaire 8, de la puissance P et du débit D.

L'ordinateur 42 détermine tout d'abord la fraction relâchée totale de ^{133}Xe ainsi que la fraction relâchée totale de ^{134}I . La fraction relâchée totale de ^{133}Xe est liée à la présence des crayons non-étanches mais également à la contamination de l'eau du circuit primaire 8 liée, par exemple, à des traces de combustible nucléaire présentes sur les assemblages 16 issus de fabrication et introduits dans le réacteur 1. En partant du principe que l'activité de ^{134}I présente dans le circuit primaire 8 provient des contaminations indépendantes de la présence du ou des crayon(s) non-étanche(s), la fraction relâchée globale de ^{133}X liée à la présence du ou des crayon(s) non-étanche(s) peut être définie par la formule :

$$\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe}) \text{ CNE} = \frac{R}{B} (^{133}\text{Xe}) \text{ totale} - \frac{R}{B} (^{134}\text{I}) \text{ totale}$$

Ainsi, un premier résultat obtenu à l'issue de l'étape du bloc 60 est la valeur de la fraction relâchée globale $\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe}) \text{ CNE}$, c'est à dire la fraction relâchée de ^{133}Xe qui peut être imputée aux crayons non-étanches.

Au cours de l'étape 60, l'ordinateur 42 va également calculer les fractions relâchées totales des autres gaz de fission à savoir $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{135}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{88}Kr , ^{87}Kr et ^{138}Xe .

Ensuite, l'ordinateur va, toujours au cours de l'étape 60, calculer une autre grandeur, dénommée pente des gaz.

Si l'on reporte ces valeurs de fractions relâchées dans un graphique logarithmique, dont les abscisses correspondent à la constante radioactive de

désintégration λ en s^{-1} du gaz de fission considéré et les ordonnées à la fraction relâchée $\frac{R}{B}$, les points ainsi obtenus peuvent être corrélés par une droite 64, comme on le voit sur la figure 4.

La valeur absolue de la pente de cette droite 64 est généralement
5 dénommée pente des gaz. Elle sera repérée par la lettre \underline{n} par la suite.

La valeur de \underline{n} est le deuxième résultat obtenu à l'issue de l'étape du bloc 60. Cette valeur de \underline{n} est représentative de la puissance linéique moyenne du ou des crayon(s) non-étanche(s).

Ensuite, l'ordinateur 42 met en œuvre une deuxième étape illustrée
10 par le bloc 66 sur la figure 3.

Cette deuxième étape va utiliser comme premier paramètre la pente des gaz \underline{n} et comme deuxième paramètre le taux de combustion TC du ou des crayon(s) non-étanche(s), pour fournir en sortie la fraction relâchée unitaire correspondant à un seul crayon non-étanche, notée $\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire.

Le taux de combustion TC peut soit être estimé par un opérateur, soit
15 déterminé par exemple à partir du rapport d'activités $\frac{^{134}\text{Cs}}{^{137}\text{Cs}}$. Dans ce dernier cas, la détermination peut être faite à partir d'abaques ou calculée par l'ordinateur 42 au cours de l'étape 60.

Pour calculer $\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire à partir de \underline{n} et de TC, l'ordinateur
20 utilise un logiciel 68 qui met en œuvre un système d'inférences flou (SIF). Ce système d'inférences flou comprend donc deux entrées et une sortie. Deux fonctions d'appartenance sont associées à chaque entrée. Ainsi, l'entrée de la pente des gaz \underline{n} est associée à une fonction d'appartenance pente \underline{n} faible et à une fonction d'appartenance pente \underline{n} forte. L'entrée taux de combustion TC est
25 associée à une fonction d'appartenance jeu J ouvert et à une fonction d'appartenance jeu J fermé.

En effet, le taux de combustion TC d'un crayon 24 est représentatif du jeu J entre les pastilles 36 et sa gaine 33.

Pour calculer la valeur de $\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire, le système d'inférences
30 flou utilise une base de quatre règles R1 à R4, exposées ci-dessous, dont les conclusions doivent être déterminées avant de pouvoir effectuer les calculs, ce qui explique la présence des points d'interrogation dans la colonne de droite.

	\underline{n}	TC	$\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire
R1	faible	Jeu ouvert	?
R2	faible	Jeu fermé	?
R3	forte	Jeu ouvert	?
R4	forte	Jeu fermé	?

Pour déterminer les règles, on fixe arbitrairement des points modaux initiaux des fonctions d'appartenance, par exemple à 0,3 et 0,5 pour la pente des gaz et à 20000 et 25000 MWj/t pour le taux de combustion.

5 Les fonctions initiales d'appartenance de la pente des gaz \underline{n} ainsi définies sont représentées sur la figure 5A, où la pente des gaz \underline{n} apparaît en abscisse et le degré d'appartenance DA en ordonnée. La fonction d'appartenance pente faible est illustrée par la courbe 70 et la fonction d'appartenance pente forte est illustrée par la courbe 72.

10 Sur la figure 5A, les courbes représentées signifient que pour une pente des gaz inférieure à 0,3, la règle qui s'appliquera sera une règle correspondant à une pente des gaz faible. Pour une pente des gaz \underline{n} supérieure à 0,5, la règle qui s'appliquera sera une règle correspondant à une pente des gaz forte, et entre ces deux valeurs, on effectuera la somme d'une règle correspondant à une pente des gaz faible pondérée par le degré d'appartenance à celle-ci, et d'une règle correspondant à une pente des gaz forte pondérée par le
15 degré d'appartenance à celle-ci

De même, la figure 5B illustre les fonctions initiales d'appartenance jeu ouvert 74 et jeu fermé 76. L'application des règles correspondant à un jeu ouvert
20 et à un jeu fermé s'effectue de manière analogue à celles pour la pente \underline{n} , c'est à dire à proportion du degré d'appartenance à la situation considérée.

Pour déterminer les règles de calcul, on utilise une base de données d'apprentissage qui regroupe des jeux de valeurs (\underline{n} ; TC ; $\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire)
25 correspondant à des cas réels apparus dans des réacteurs. Une telle base peut être représentée par un tableau comprenant les colonnes suivantes.

Cas	\underline{n}	TC	$\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire

A titre d'exemple, cette base de données comprend au moins 15 cas.

La détermination des règles est obtenue par exemple en appliquant successivement un algorithme d'apprentissage rapide (APR) qui considère trois cas pour calculer le barycentre, puis un algorithme de SOLIS & WETTS avec 500 itérations, à nouveau l'algorithme APR puis une descente de gradient effectuée par exemple 10 fois. A l'issue de cet apprentissage, on obtient les règles suivantes :

	\underline{n}	TC	$\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire
R1	faible	Jeu ouvert	0.012
R2	faible	Jeu fermé	0.003
R3	forte	Jeu ouvert	0.055
R4	forte	Jeu fermé	0.005

Les fonctions d'appartenance ont été alors redéfinies comme on le voit sur les figures 6A et 6B, où les points modaux valent maintenant respectivement 0,49 ; 0,73 ; 26000 et 36500.

L'ordinateur 42 calcule à partir de ce système d'inférences flou et en appliquant la méthode de TAKAGI-SUGENO $\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire en fonction des \underline{n} et TC fournis.

Ainsi, pour une pente \underline{n} ayant un degré d'appartenance pente faible de 0,4 et un degré d'appartenance jeu ouvert de 0,7, la formule de calcul sera la suivante :

$$\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe}) \text{ unitaire} = 0,4 \times (0,7 \times R1 + 0,3 \times R2) + 0,6 \times (0,7 \times R3 + 0,3 \times R4).$$

La valeur de $\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire calculée est le résultat fourni par la deuxième étape 66.

Plutôt que d'introduire un taux de combustion TC donné on peut, par exemple via les moyens 46 de saisie, définir une plage de taux de combustion TC et un pas de parcours. L'ordinateur 42 va alors parcourir la plage de taux de combustion TC et fournir en sortie de l'étape 66 des couples (TC ; $\frac{R}{B} (^{133}\text{Xe})$ unitaire).

Dans une troisième étape illustrée par le bloc 80, l'ordinateur 42 va estimer le nombre N de crayons non-étanches en divisant la valeur $\frac{R}{B}({}^{133}\text{Xe})$

CNE par $\frac{R}{B}({}^{133}\text{Xe})$ unitaire.

5 Si une plage de taux de combustion TC a été introduite, cette étape fournit en sortie une plage de valeur N.

Le tableau ci-dessous permet de comparer le nombre N de crayons non-étanches effectivement constaté dans des assemblages ayant subi un seul cycle, deux cycles et trois cycles et donc le nombre N total de crayons non-étanches dans un cœur 2, et les estimations données par le procédé décrit dans l'exposé de 2002 mentionné précédemment, ainsi que par le procédé de la présente invention.

Cas	N-1 cycle	N-2 cycles	N-3 cycles	N total	Estimation art antérieur	Invention
A	0	0	1	1	≥ 1	1
B	0	2	0	2	1	1
C	1	4	0	5	1	4
D	0	6	1	7	1	4 à 8
E	3	0	1	4	2	3 à 4
F	0	2	0	2	1	2
G	0	0	1	1	≥ 1	1
H	0	1	0	1	≥ 1	1
I	2	1	0	3	1	2
J	10	0	0	10	6	10
K	0	0	≥ 60	≥ 60	1	34
L	0	1	1	2	1	1

15 Le procédé de l'invention est donc plus fiable que celui de l'art antérieur et sous-estime moins le nombre de crayons non-étanches présents. En outre, il ne nécessite pas d'attendre ou d'engendrer l'apparition d'un transitoire de fonctionnement.

20 En variante, la base de données d'apprentissage peut être enrichie au fur et à mesure de nouveaux cas réels constatés lors d'arrêt de cycles de réacteurs existants. De préférence, on utilisera des cas où le nombre de crayon

non-étanche constaté est de 1. On peut prendre des cas où le nombre de crayons non-étanches est plus important, si les crayons concernés ont des puissances linéiques moyennes et des taux de combustion comparables. On effectue alors un réapprentissage du système d'inférences flou à partir de la base
5 données complétée.

De manière plus générale, l'étape du bloc 66 pourra être mise en œuvre en utilisant à la place de la pente des gaz \underline{n} , tout autre paramètre représentatif de la puissance linéique des crayons non-étanche(s), et à la place du taux de combustion TC tout autre paramètre représentatif du jeu J, par
10 exemple la durée du séjour en réacteur. De manière plus générale, l'étape du bloc 66 peut être mise en œuvre en utilisant plus de deux paramètres. Un troisième paramètre peut par exemple être un paramètre représentatif de la gravité des défauts d'étanchéité, par exemple la taille de ces défauts.

Bien entendu, l'ordinateur 42 peut mettre en œuvre d'autres étapes de
15 diagnostic, par exemple de détermination de la gravité ou de la localisation des défauts d'étanchéité, par exemple des étapes telles que celles décrite dans l'exposé précité présenté lors du congrès de l'IAEA. Le résultat d'une telle étape de détermination de la gravité des défauts d'étanchéité peut être utilisée en tant que troisième paramètre utilisé pour le système d'inférences flou.

20 De manière plus générale également, les principes décrits ci-dessus peuvent être appliqués à des réacteurs à eau bouillante.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'estimation du nombre (N) de crayon(s) non-étanche(s) dans des assemblages de combustible nucléaire chargés dans un réacteur (1), le
5 procédé comprenant les étapes consistant à :

a) calculer la fraction relâchée globale ($\frac{R}{B}({}^{133}\text{Xe})$ CNE) d'au moins un produit de fission (${}^{133}\text{Xe}$) au travers du ou des crayon(s) non-étanche(s) à partir de mesures effectuées sur le réacteur nucléaire,

b) fournir une valeur d'un premier paramètre (\underline{n}) représentatif de la
10 puissance linéique du ou des crayon(s) (24) non-étanche(s),

c) fournir une valeur au moins d'un deuxième paramètre représentatif du jeu entre la gaine (33) du ou des crayon(s) (24) non-étanche(s) et le combustible (36) qui y est contenu,

d) estimer à partir des valeurs des premier et deuxième paramètres la
15 fraction relâchée unitaire du produit de fission pour un crayon non-étanche ($\frac{R}{B}({}^{133}\text{Xe})$ unitaire), et

e) déduire, de la fraction relâchée globale et de la fraction relâchée unitaire, le nombre (N) de crayon(s) non-étanche(s).

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'étape d)
20 est assurée grâce à un système d'inférences flou.

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que le système d'inférences flou met en œuvre des règles de calcul déterminées par apprentissage à partir d'une base de données regroupant des jeux de valeurs du premier et deuxième paramètres et de la fraction relâchée unitaire pour des cas
25 réels.

4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des étapes consistant à :

f) mettre à jour la base de données d'apprentissage à partir de valeurs correspondant à au moins un nouveau cas réel,

30 g) effectuer un réapprentissage du système d'inférences flou.

5. Procédé selon la revendication 2, 3 ou 4, caractérisé en ce que le système d'inférences flou comprend deux fonctions d'appartenance par paramètre.

5 6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le premier paramètre est la pente (n) d'une droite de corrélation de points correspondants à des gaz de fission dans un diagramme logarithmique constante radioactive de désintégration/fraction relâchée.

7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le deuxième paramètre est le taux de combustion (TC).

10 8. Dispositif (40) d'estimation du nombre de crayon(s) non-étanche(s) dans des assemblages de combustible nucléaire chargés dans un réacteur (1), caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de mise en œuvre des étapes d'un procédé selon l'une des revendications précédentes.

15 9. Dispositif selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un ordinateur (42) et des moyens (44) de stockage dans lesquels sont stockés au moins un programme pour l'exécution des étapes du procédé d'estimation.

10. Support utilisable dans un ordinateur sur lequel est enregistré un programme selon la revendication 9.

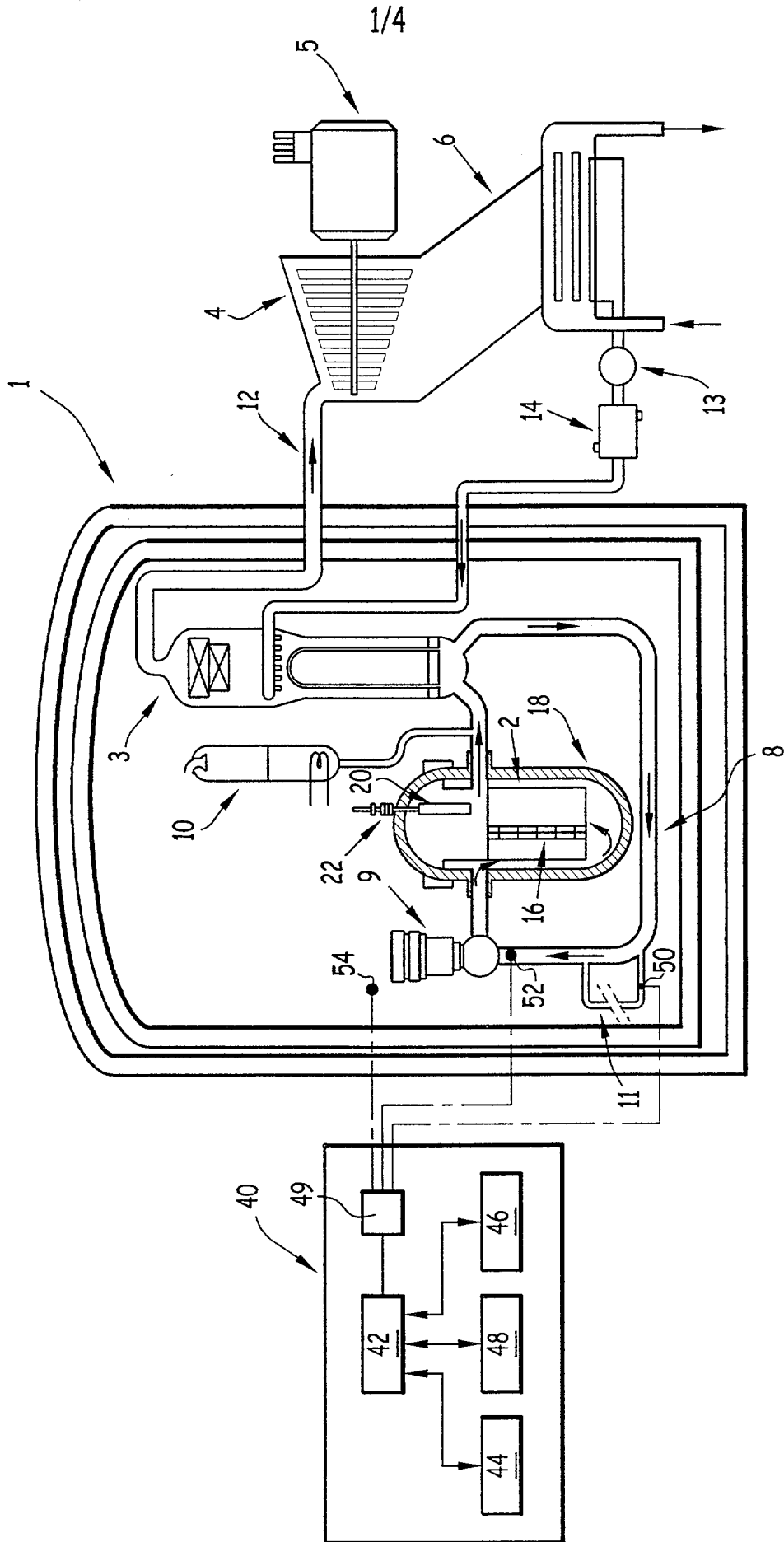


FIG.1

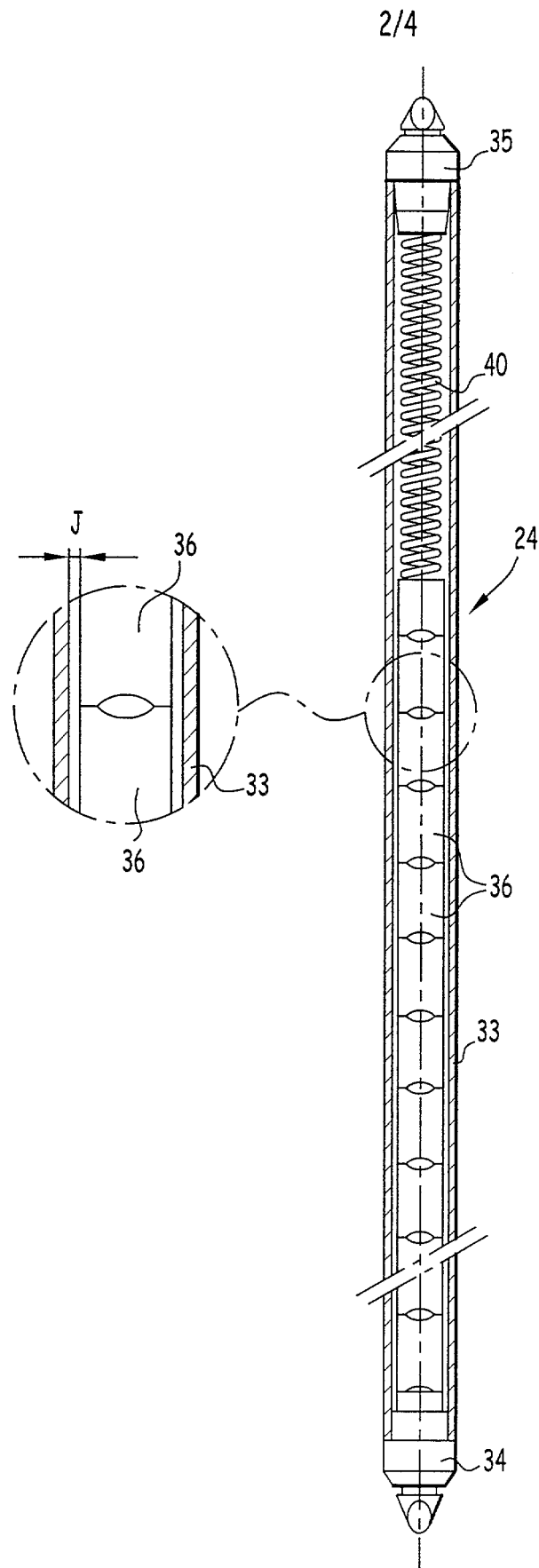
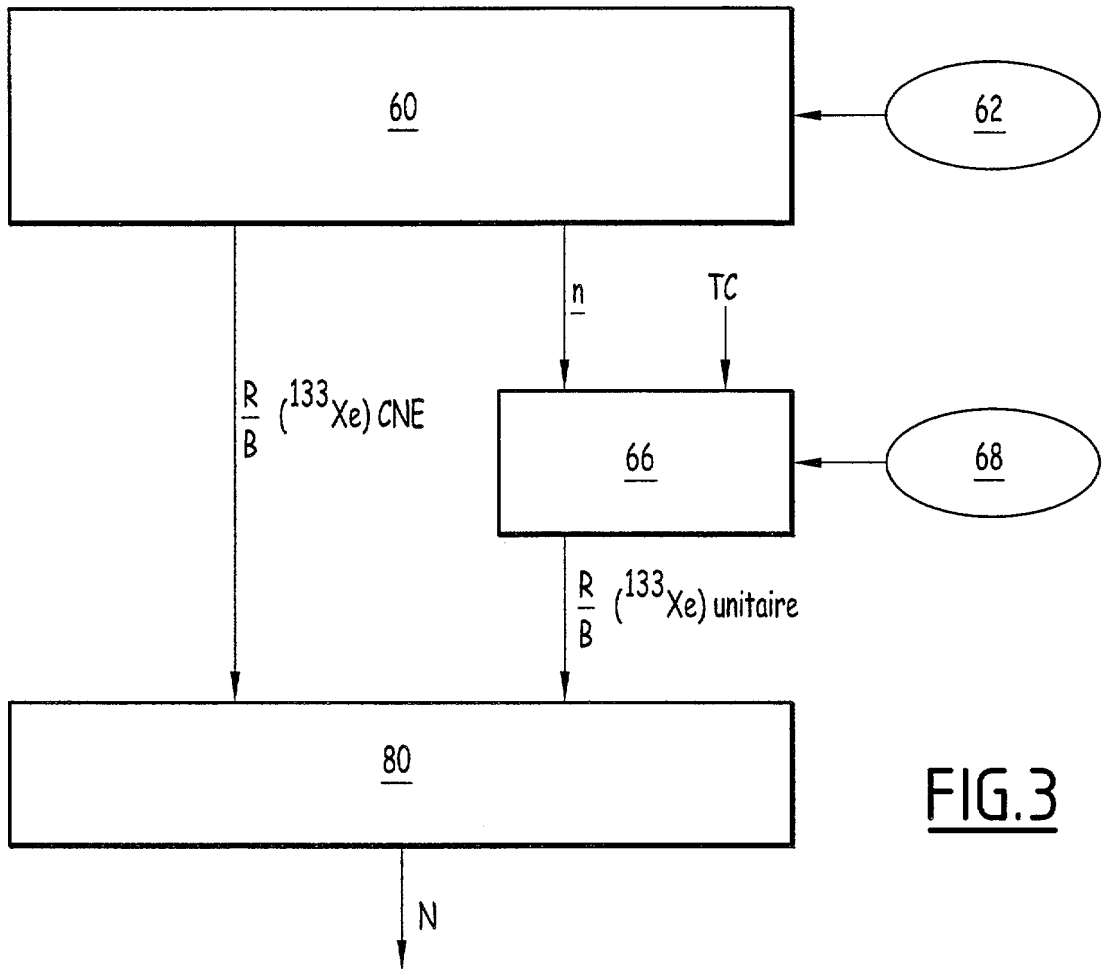
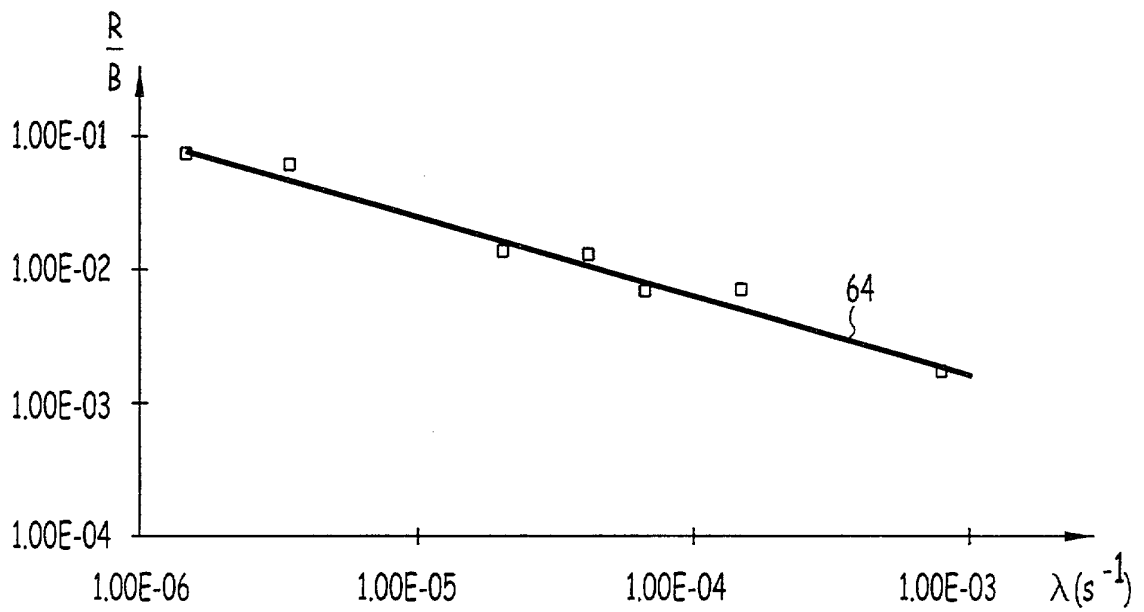
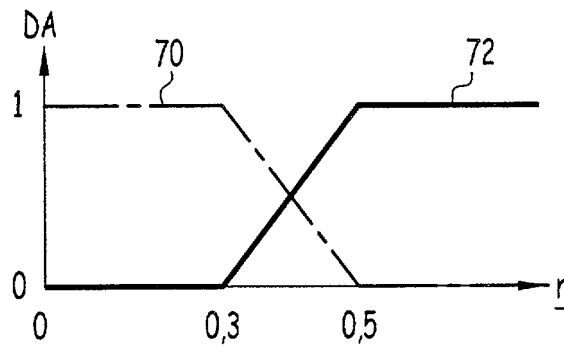
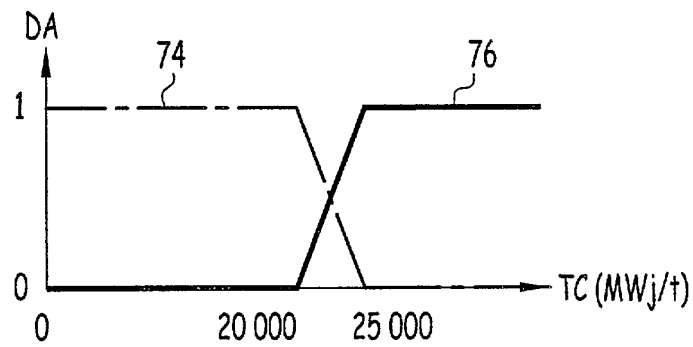
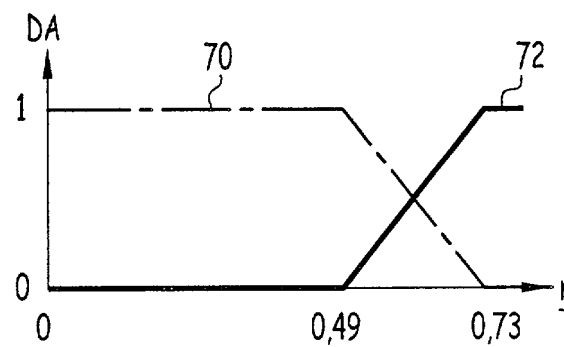
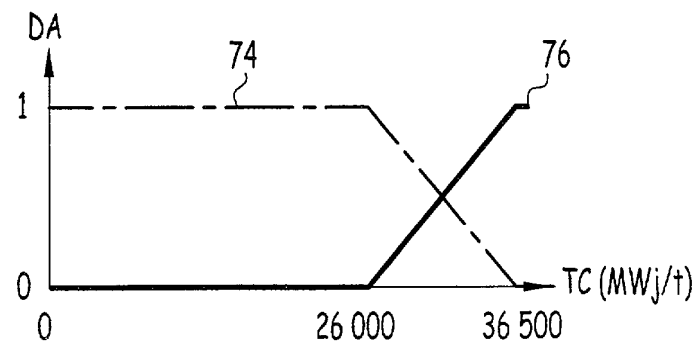


FIG. 2

3/4

FIG.3FIG.4

4/4

FIG.5AFIG.5BFIG.6AFIG.6B



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 640989
FR 0309166

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	US 4 764 335 A (NOMURA SHIGEO ET AL) 16 août 1988 (1988-08-16) * le document en entier * -----	1-9	G21C17/00
D,A	PARRAT GENIN MUSANTE PETIT HARRER: "failed rod diagnosis and primary circuit contamination level determination thanks to the diademe code" mars 2003 (2003-03), INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY , BRATISLAVA - SLOVAKIA , XP001191027 * page 265 - page 276 * -----	1-9	
D,A	WO 99/27541 A (SIHVER LEMBIT ; ASEA ATOM AB (SE); BJURMAN BJOERN (SE); AERLEBAECK ING) 3 juin 1999 (1999-06-03) * le document en entier * -----	1-9	
A	FR 2 535 100 A (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP) 27 avril 1984 (1984-04-27) * le document en entier * -----	1-9	
A	WO 01/39207 A (SIHVER LEMBIT ; WESTINGHOUSE ATOM AB (SE)) 31 mai 2001 (2001-05-31) * le document en entier * -----	1-9	
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 0151, no. 84 (P-1200), 13 mai 1991 (1991-05-13) & JP 3 041396 A (TOSHIBA CORP), 21 février 1991 (1991-02-21) * abrégé * -----	1-9	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7) G21C
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
3 juin 2004		Deroubaix, P	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un		à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date	
autre document de la même catégorie		de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande	
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons	
P : document intercalaire		
		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0309166 FA 640989**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 03-06-2004

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 4764335	A	16-08-1988	JP 1798097 C	12-11-1993
			JP 4072200 B	17-11-1992
			JP 63246700 A	13-10-1988

WO 9927541	A	03-06-1999	SE 514184 C2	22-01-2001
			AU 1514999 A	15-06-1999
			DE 69811529 D1	27-03-2003
			DE 69811529 T2	19-02-2004
			EP 1031159 A1	30-08-2000
			ES 2190615 T3	01-08-2003
			JP 2001524679 T	04-12-2001
			SE 9704286 A	22-05-1999
			WO 9927541 A1	03-06-1999
			US 6345081 B1	05-02-2002

FR 2535100	A	27-04-1984	DE 3322358 A1	26-04-1984
			FR 2535100 A1	27-04-1984
			GB 2129188 A ,B	10-05-1984
			JP 59079899 A	09-05-1984

WO 0139207	A	31-05-2001	SE 514803 C2	30-04-2001
			AU 1910801 A	04-06-2001
			WO 0139207 A1	31-05-2001
			SE 9904316 A	30-04-2001

JP 3041396	A	21-02-1991	AUCUN	
